Cementos, morteros y hormigones

1. Cementos

Juan Antonio Polanco Madrazo

Jesús Setién Marquínez

DPTO. DE CIENCIA E INGENIERÍA DEL TERRENO Y DE LOS MATERIALES

Este tema se publica bajo Licencia:

Creative Commons BY-NC-SA 3.0

Los Cementos

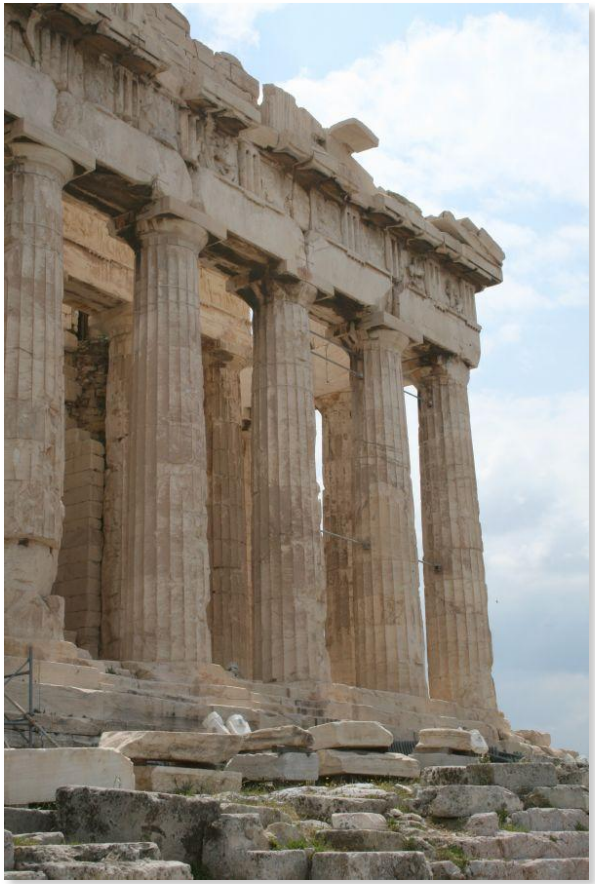
Photo by CrniBombarder!!! (from Wikimedia Commons). This file is licensed under the Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license.

Aproximación histórica

Los **morteros** con fines constructivos se fabricaban en el Antiguo Egipto a partir de yeso

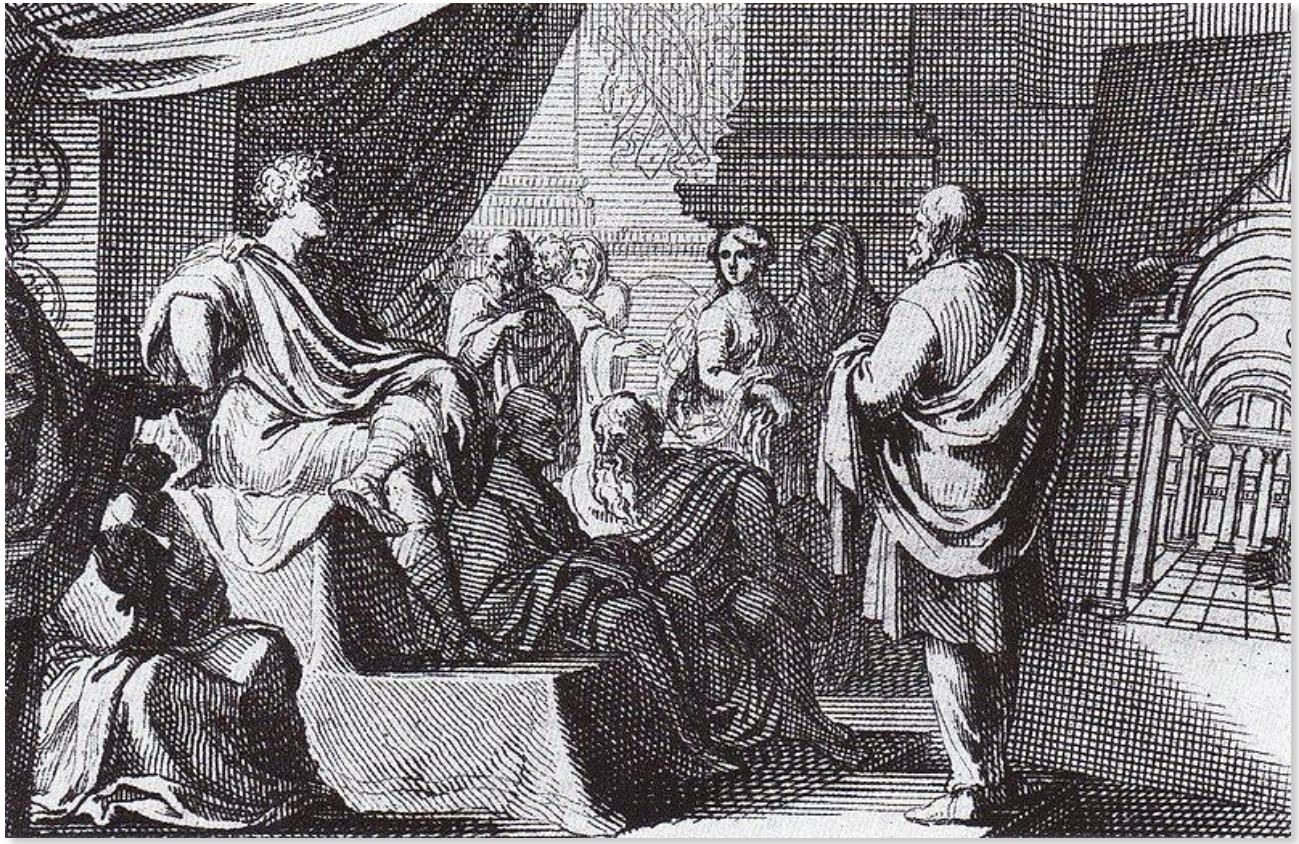
Aproximación histórica

La utilización de la **cal** como conglomerante no tuvo lugar hasta las épocas griega y romana



Aproximación histórica

El ingeniero romano **VITRUBIO** describía la fabricación de **morteros hidráulicos** a partir de **cal apagada**, **arena** y una **puzolana**



Aproximación histórica

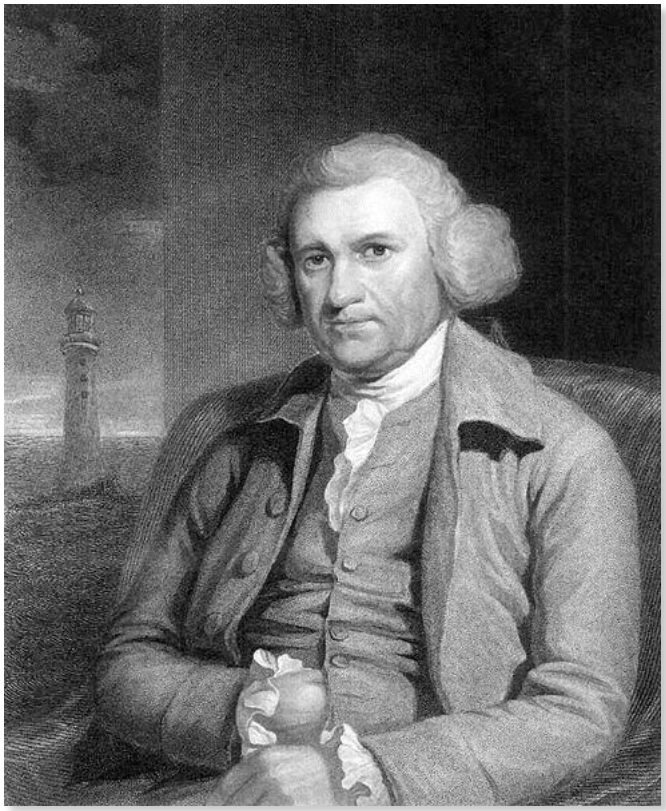
PLINIO recomendaba una proporción de una parte de **cal** por cuatro de **arena** para elaborar un mortero a utilizar como elemento de unión en aplicaciones ordinarias de construcción

Aproximación histórica

No obstante, aunque griegos y romanos desarrollaron una considerable maestría en la formulación de estos morteros, particularmente en relación con la mejora de sus propiedades hidráulicas por la adición de una **puzolana**, sus conocimientos químicos no eran suficientemente completos para explicar los fenómenos implicados

Aproximación histórica

En 1756, el ingeniero inglés **John SMEATON** fue contratado para erigir un nuevo faro en Eddystone, al quedar destruido por un incendio el antiguo



Las condiciones de trabajo en una obra marítima requerían buscar un material adecuado

SMEATON realizó diversos intentos empleando cales de distinto origen

Aproximación histórica

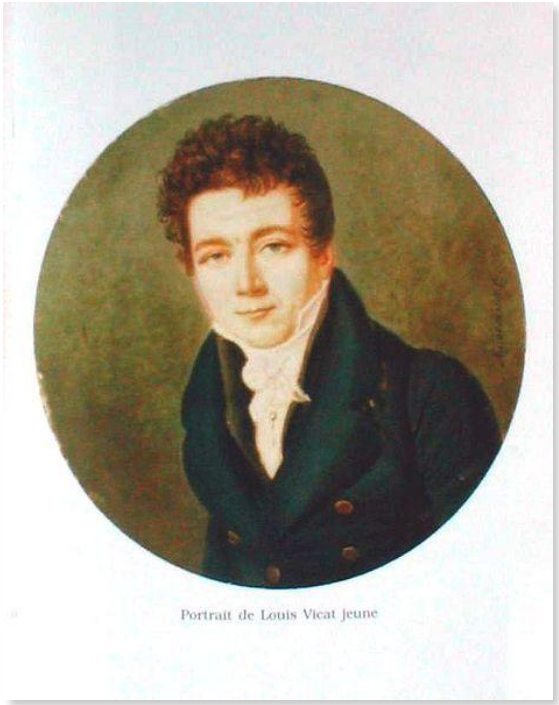
Fig. 48.—Smeaton's Eddystone Lighthouse.

Descubrió que las **cales** que daban mejores resultados eran aquellas que contenían una considerable proporción de **materia arcillosa** en su composición, a las que añadía una **puzolana**

Era la primera ocasión en que se reconocían las propiedades de las **cales hidráulicas**

Aproximación histórica

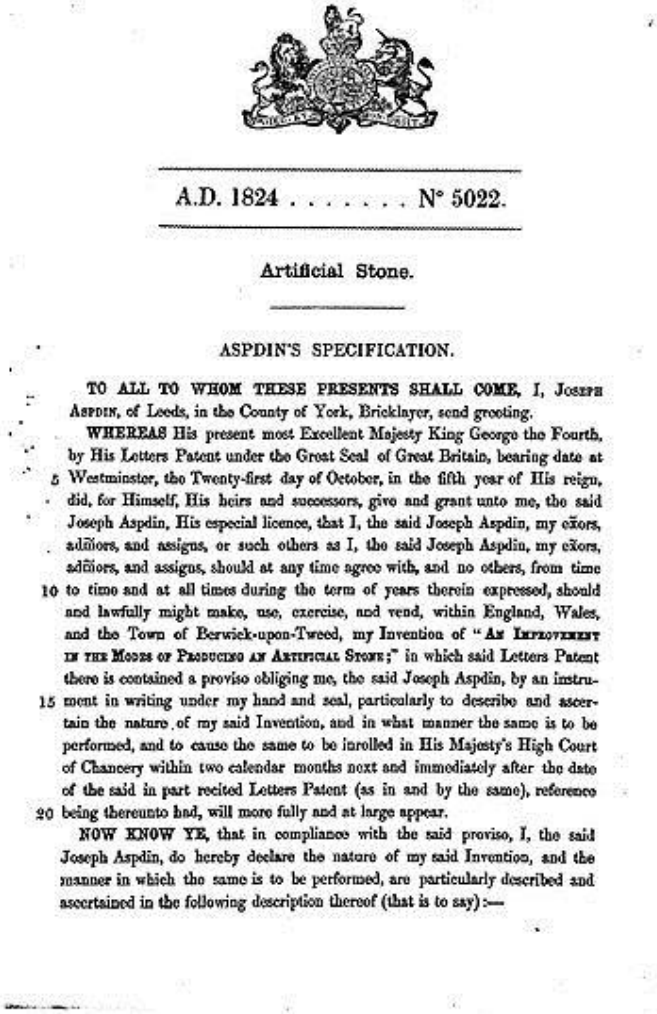
Las investigaciones llevadas a cabo sobre la hidraulicidad de las **cales** que contenían **arcillas** condujeron a la aparición de los primeros cementos naturales, avanzadilla de los actuales **portland**


Portrait de Louis Vicat jeune

En 1818 el ingeniero francés **Louis Joseph VICAT** abrió un nuevo campo a los **cementos** al preparar una **cal artificial** calcinando una mezcla íntima de **caliza** y **arcilla** molidas conjuntamente en húmedo

Aproximación histórica

En 1824, el constructor inglés **Joseph ASPDIN** patentó bajo el nombre de **cemento portland** un material pulverulento que amasado con agua y con arena se endurecía formando un conglomerado de aspecto parecido a las calizas de la península de Portland, al sur de Inglaterra



A.D. 1824 . . . . . N° 5022.

Artificial Stone.

ASPDIN'S SPECIFICATION.

TO ALL TO WHOM THESE PRESENTS SHALL COME, I, Joseph Aspdin, of Leeds, in the County of York, Bricklayer, send greeting.

WHEREAS His present most Excellent Majesty King George the Fourth, by His Letters Patent under the Great Seal of Great Britain, bearing date at Westminster, the Twenty-first day of October, in the fifth year of His reign, did, for Himself, His heirs and successors, give and grant unto me, the said Joseph Aspdin, His especial licence, that I, the said Joseph Aspdin, my exors, admors, and assigns, or such others as I, the said Joseph Aspdin, my exors, admors, and assigns, should at any time agree with, and no others, from time to time and at all times during the term of years therein expressed, should and lawfully might make, use, exercise, and vend, within England, Wales, and the Town of Berwick-upon-Tweed, my Invention of "An Improvement in the Mode of Producing an Artificial Stone;" in which said Letters Patent there is contained a proviso obliging me, the said Joseph Aspdin, by an instrument in writing under my hand and seal, particularly to describe and ascertain the nature of my said Invention, and in what manner the same is to be performed, and to cause the same to be inrolled in His Majesty's High Court of Chancery within two calendar months next and immediately after the date of the said in part recited Letters Patent (as in and by the same), reference being thereunto had, will more fully and at large appear.

NOW KNOW YE, that in compliance with the said proviso, I, the said Joseph Aspdin, do hereby declare the nature of my said Invention, and the manner in which the same is to be performed, are particularly described and ascertained in the following description thereof (that is to say):—

Aproximación histórica

Probablemente, el material patentado por **ASPDIN** era una **caliza hidráulica** debido, entre otras cosas, a las bajas temperaturas empleadas en la cocción

Aproximación histórica

El prototipo de **cemento portland** moderno, tal como hoy lo conocemos, fue producido por vez primera a escala industrial por **Isaac Charles JOHNSON** en 1845, al moler finamente los nódulos sobrecocidos que quedaban a la salida del horno de **ASPDIN**

Con esta idea mejoró las dosificaciones de las mezclas de **caliza** y **arcilla**, y logró aumentar las temperaturas de cocción hasta lograr la sinterización de las mismas

Aproximación histórica

Es a partir de 1900 cuando los **cementos portland** se imponen en las obras de ingeniería y cuando empieza un descenso veloz en el consumo de los cementos naturales

Los Cementos

El **cemento** es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido que, amasado con agua forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua

De todos los conglomerantes hidráulicos, el **cemento portland** y sus derivados son los más empleados en la construcción debido a estar formados, básicamente, por mezclas de caliza, arcilla y yeso, que son minerales muy abundantes en la naturaleza, ser su precio relativamente bajo en comparación con otras soluciones alternativas y tener unas propiedades adecuadas para las metas que deben alcanzar

Los Cementos

Los cementos se emplean, fundamentalmente, para elaborar **morteros** y **hormigones** cuando se mezclan con áridos y agua, obteniéndose con ellos elementos constructivos. La *pasta de conglomerante*, una vez hidratada, constituye el nexo de unión, actuando como suministrador de resistencias mecánicas

Con **arena** para obtener **MORTEROS**

Con áridos para obtener **HORMIGONES**

Los Cementos

La preparación de un cemento comercial requiere la fabricación de un clínker, el cual, finamente molido y con las adiciones oportunas, constituye el núcleo-cemento, al que es preciso añadir, en la mayoría de los casos, un regulador de fraguado y, eventualmente, ciertos aditivos para formar el cemento

Existen dos tipos de clínker: el clínker de portland y el clínker aluminoso. El primero es la base de los denominados Cementos Comunes (CEM), mientras que, el segundo, es el componente principal del Cemento de Aluminato de Calcio (CAC)

Cementos comunes (CEM)

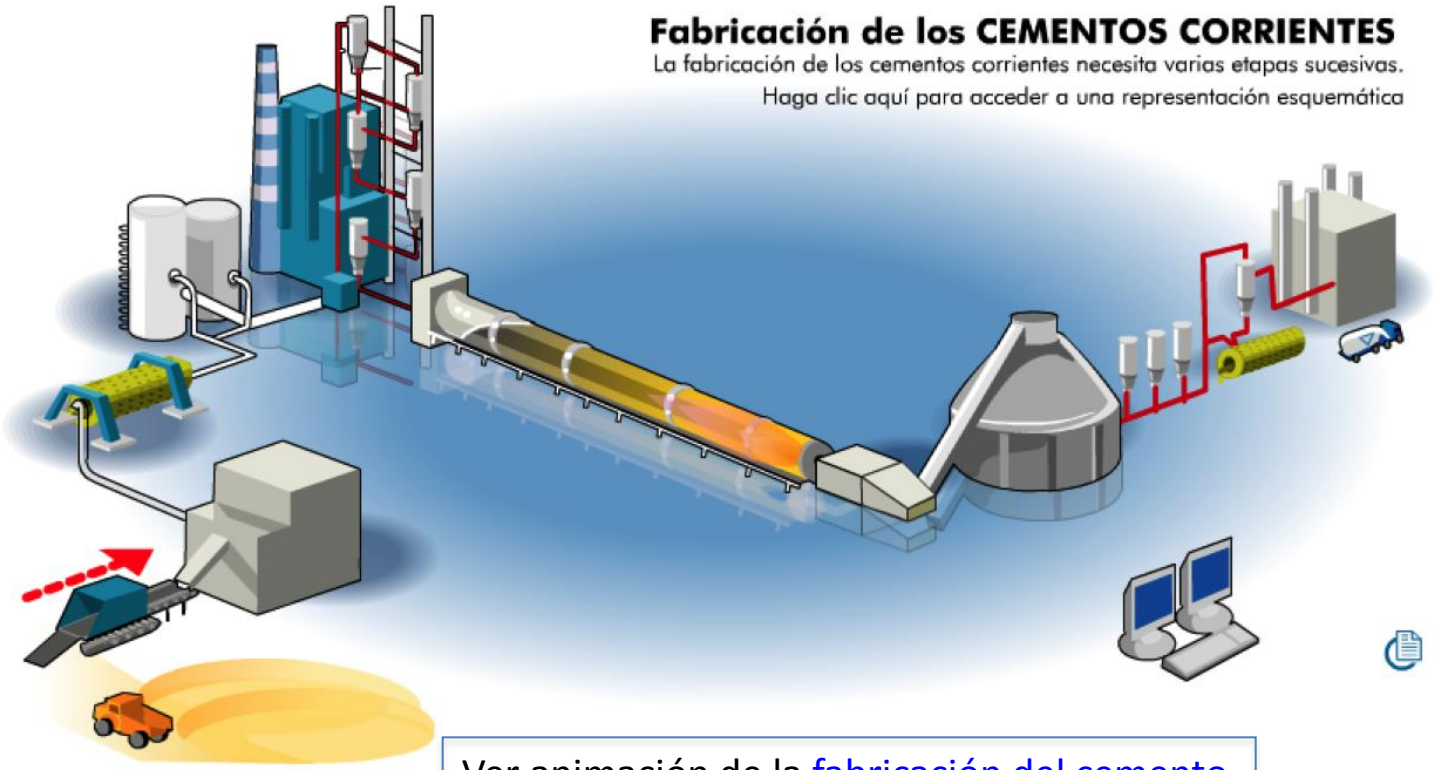
Clínker de portland: producto obtenido por la sinterización de una mezcla de materias primas especificada con precisión, conteniendo elementos expresados normalmente en forma de óxidos (CaO, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3) y pequeñas cantidades de otras materias

Núcleo-cemento: clínker de portland junto con el resto de componentes principales y minoritarios, excluyendo el regulador de fraguado y posibles aditivos

Cementos comunes (CEM)

Tipos principales	Designación de los 27 productos (tipos de cementos comunes)		Composición (proporción en masa)										
			Componentes principales										Componentes minoritarios
			Clínker	Escoria de horno alto	Humo de sílice	Puzolana		Cenizas volantes		Esquistos calcinados	Caliza		
						natural	natural calcinada	silíceas	calcáreas				
			K	S	D	P	Q	V	W	T	L	LL	
CEM I	Cemento Portland	CEM I	95-100	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
CEM II	Cemento Portland con escoria	CEM II/A-S	80-94	6-20	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
	Cemento Portland con humo de silice	CEM II/A-D	90-94	–	6-10	–	–	–	–	–	–	–	0-5
	Cemento Portland con puzolana	CEM II/A-P	80-94	–	–	6-20	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM II/B-P	65-79	–	–	21-35	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	–	–	–	6-20	–	–	–	–	–	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	–	–	–	21-35	–	–	–	–	–	0-5
	Cemento Portland con ceniza volante	CEM II/A-V	80-94	–	–	–	–	6-20	–	–	–	–	0-5
		CEM II/B-V	65-79	–	–	–	–	21-35	–	–	–	–	0-5
		CEM II/A-W	80-94	–	–	–	–	–	6-20	–	–	–	0-5
		CEM II/B-W	65-79	–	–	–	–	–	21-35	–	–	–	0-5
	Cemento Portland con esquisto calcinado	CEM II/A-T	80-94	–	–	–	–	–	–	6-20	–	–	0-5
		CEM II/B-T	65-79	–	–	–	–	–	–	21-35	–	–	0-5
	Cemento Portland con caliza	CEM II/A-L	80-94	–	–	–	–	–	–	–	6-20	–	0-5
		CEM II/B-L	65-79	–	–	–	–	–	–	–	21-35	–	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	–	–	–	–	–	–	–	–	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	–	–	–	–	–	–	–	–	21-35	0-5
	Cemento Portland mixto	CEM II/A-M	80-94	<---------- 6-20 ---------->									0-5
		CEM II/B-M	65-79	<---------- 21-35 ---------->									0-5
CEM III	Cemento con escorias de horno alto	CEM III/A	35-64	36-65	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
CEM IV	Cemento puzolánico	CEM IV/A	65-89	–	<---------- 11-35 ---------->					–	–	–	0-5
		CEM IV/B	45-64	–	<---------- 36-55 ---------->					–	–	–	0-5
CEM V	Cemento compuesto	CEM V/A	40-64	18-30	–	<------- 18-30 -------->			–	–	–	–	0-5
		CEM V/B	20-38	31-50	–	<------- 31-50 -------->			–	–	–	–	0-5

Fabricación del Cemento

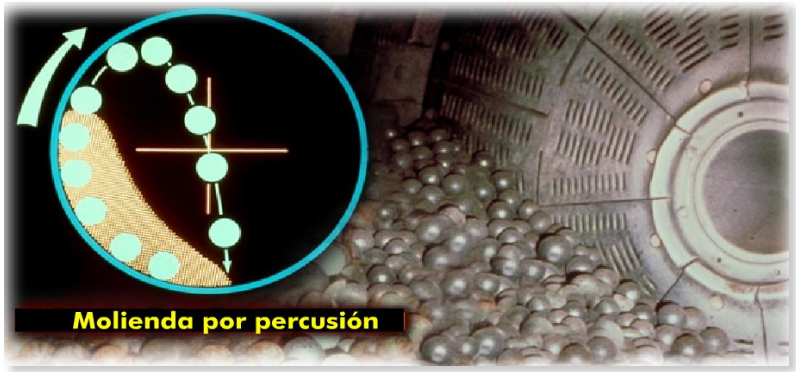


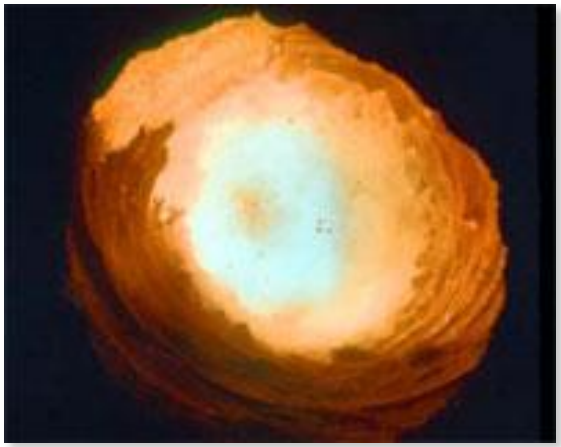
Ver animación de la fabricación del cemento

Ver animación de la fabricación del hormigón

Ver animación de tratamiento de áridos

Fabricación del Cemento





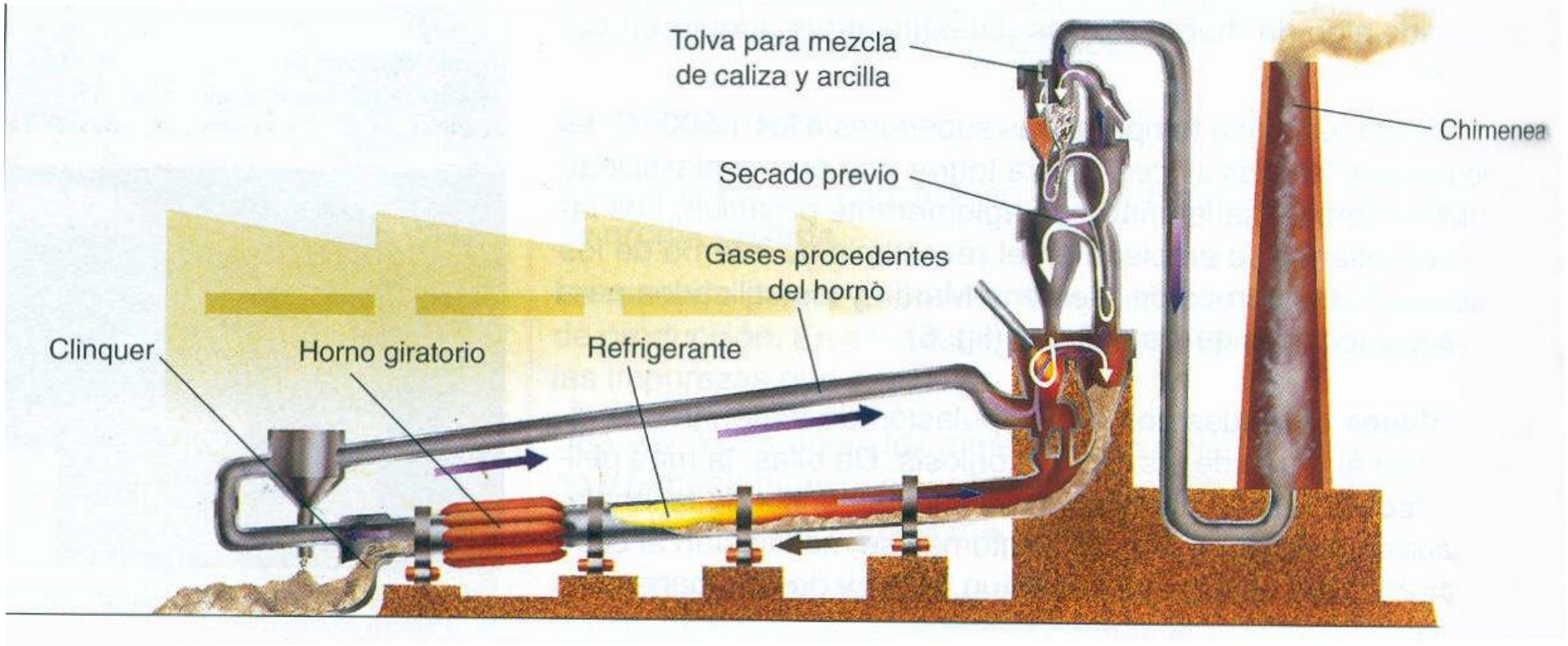
Fabricación del Cemento

Combustibles

- Pueden ser **carbones** de lignito o de hulla, diferentes tipos de **fuel-oils** o **gas natural**
  - Los **carbones** son el tipo de combustible que exige instalaciones más complejas y costosas (secaderos, molinos, filtros,…)
  - Los **fuel-oils** son más económicos en cuanto a instalaciones (depósitos) y el **gas natural** prácticamente no exige ninguna (tuberías de suministro)

  Incineración de desechos: neumáticos, aceites de desecho, residuos de pinturas, biomasa, desechos sólidos urbanos, residuos médicos, lodos cloacales, etc.

Fabricación del Cemento



Reacciones de clinkerización

- A **100 ºC**: se produce la evaporación del agua que contenga el crudo

Fabricación del Cemento

– A **1000 ºC**: se produce la combustión de la materia orgánica, la descarbonatación de la caliza y la pérdida del agua de constitución de la arcilla, la cual se descompone y entra en actividad para combinarse sus óxidos con la **cal**

$$CaCO_3 + \text{calor} \rightarrow CaO + CO_2$$
$$2SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot 2H_2O \rightarrow 2SiO_2 + Al_2O_3 + 2H_2O$$

} **Calcinación**

– A **1200 ºC**: el óxido férrico existente y la alúmina separada de la arcilla reaccionan con la **cal** y originan **ferroaluminato tetracálcico** y **aluminato tricálcico**

$$Fe_2O_3 + Al_2O_3 + 4CaO \rightarrow Fe_2O_3 \cdot Al_2O_3 \cdot 4CaO$$
$$Al_2O_3 + 3CaO \rightarrow Al_2O_3 \cdot 3CaO$$

Estos dos compuestos forman una masa pastosa denominada **lecho fundido** en el cual flotan la **sílice** y la **cal** restantes en estado sólido

Fabricación del Cemento

- Entre **1200 ºC** y **1300 ºC**: se verifica la reacción de la **cal** y la **sílice** para formar **silicato bicálcico**, debiendo sobrar **cal**

$$SiO_2 + 2CaO \rightarrow SiO_2 \cdot 2CaO + (CaO)$$

Este compuesto tiene carácter hidráulico, pero si se detuviera el proceso a esta temperatura los cementos solamente tendrían resistencia a largo plazo

- Entre **1400 ºC** y **1450 ºC**: parte del **silicato bicálcico** formado reacciona con la **cal** sobrante y se forma el **silicato tricálcico**

$$SiO_2 \cdot 2CaO + CaO \rightarrow SiO_2 \cdot 3CaO$$

Este compuesto es el componente hidráulico por excelencia, al cual se deben las resistencias mecánicas iniciales del cemento

Composición potencial

ÓXIDOS PRESENTES EN UN CLÍNKER DE PORTLAND			
Nombre	Composición	Peso molecular	Fórmula abreviada
Cal	CaO	56	C
Sílice	SiO_2	60	S
Aluminio	Al_2O_3	102	A
Hierro	Fe_2O_3	160	F
Agua	H_2O	18	H
Anhídrido sulfúrico	SO_3	80	$\bar{S}$
Magnesia	MgO	40	M
Sodio	Na_2O	62	N
Potasio	K_2O	94	K

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE UN CEMENTO			
Nombre	Composición	Proporción (%)	
		Clínker	Cemento
Sílice	SiO_2	21,4	19,9
Alúmina	Al_2O_3	5,5	5,1
Hierro	Fe_2O_3	3,8	3,5
Cal combinada	CaO	66,4	64,0
Magnesia	MgO	1,4	1,3
Azufre	SO_3	0,3	3,6
Pérdida al fuego	P.F.	0,2	1,6
Cal libre	CaO	1,0	0,9
Residuo insoluble	R.I.	0,1	0,1
Álcalis	$Na_2O + K_2O$	0,9	0,8

$$\frac{CaO}{SiO_2} > 2$$

COMPONENTES PRINCIPALES DEL CLÍNKER DE PORTLAND				
Nombre	Composición	Fórmula reducida	Nombre mineral	Composición potencial (%)
Silicato tricálcico	$3\,CaO\,SiO_2$	C_3S	Alita	40-50
Silicato bicálcico	$2\,CaO\,SiO_2$	C_2S	Belita	20-30
Aluminato tricálcico	$3\,CaO\,Al_2O_3$	C_3A	—	10-15
Ferrito aluminato tetracálcico	$4\,CaO\,Al_2O_3\,Fe_2O_3$	C_4AF	Celita	5-10

Composición potencial

CARACTERÍSTICAS DE LOS COMPUESTOS PRINCIPALES				
Compuesto	Velocidad de hidratación	Calor de hidratación	Desarrollo de resistencia	Resistencia química
C_3S	Grande	Grande y rápido (120 cal/g)	Rápido y prolongado	Pequeña
C_2S	Pequeña	Pequeño y lento (62 cal/g)	Lento y muy prolongado	Intermedia
C_3A	Muy grande	Muy grande y rápido (207 cal /g)	Muy rápido y de corta duración	Muy pequeña
C_4AF	Grande	Moderado y lento (100 cal/g)	Lento y poco significativo	Grande

Compuestos secundarios

Cal libre: presente en una pequeña proporción (0,5 a 1%), provoca expansividad si se hidrata durante el endurecimiento

Magnesia: su contenido se limita al 5%, dado su carácter expansivo

Álcalis: son reactivos con un grupo de áridos de naturaleza silícea, generando sales expansivas

Composición potencial

Límites de composición química: módulos e índices

Si se comparan los análisis químicos de los cementos portland, se observa que existe siempre un margen de valores para determinados **módulos** e **índices**, por lo que estos parámetros marcan los límites de composición química del cemento

Índice de hidraulicidad (VICAT, 1833): considera únicamente la sílice, la alúmina y la cal, y debe tener una valor comprendido entre **0.50** y **0.64** para el clínker de portland

$$IV = \frac{SiO_2 + Al_2O_3}{CaO}$$

Composición potencial

Módulo hidráulico: se representa por

$$MH = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

Debe estar comprendido entre **1.7** y **2.3**. Los cementos de buena calidad tienen un MH del orden de **2**

Los de valor inferior a **1.7** generan resistencias mecánicas débiles y los de valor superior a **2.3** presentan inestabilidad de volumen

Composición potencial

Módulo de silicatos: se representa por

$$MS = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

Su valor debe estar comprendido entre **1.9** y **3.2**, aunque en los cementos blancos y ricos en sílice se llegue hasta **5**

Su valor normal es próximo a **2**. Los valores altos indican cementos de fraguado y endurecimiento lento y cementos con malas condiciones de cocción

Composición potencial

Módulo de fundentes: se representa por

$$MF = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$$

Su valor oscila entre **1.5** y **2.5**, siendo un valor normal el **2**

Este módulo influye, de forma decisiva, en la formación de fase líquida durante la clinkerización. Un módulo alto, para uno de silicatos bajo, da lugar a un cemento de fraguado rápido, exigiendo una mayor cantidad de yeso como regulador. Si el **MF** es igual a **0.637** toda la alúmina estará formando **FAC_4** y no se formará nada de **AC_3**

Composición potencial

Índice de saturación en cal: a fin de que no exista ni exceso ni defecto de **cal**, debido a que un exceso puede producir cementos expansivos y un defecto cementos de bajas resistencias y lentos en su fraguado y endurecimiento, es preciso que la relación entre el contenido de **cal disponible** en el clínker y el contenido de **cal combinada** para formar los cuatro compuestos principales (**cal reactiva**) se aproxime lo máximo posible a la unidad

$$IS = \frac{CaO - 0.7SO_3}{2.8SiO_2 + 1.2Al_2O_3 + 0.65Fe_2O_3}$$

Normalmente, los cementos portland tienen un **IS** que oscila entre **0.85** y **0.90**. En cualquier caso, este índice nunca debe ser inferior a **0.7** ni superior a **1.02**

Composición potencial

Formulación de BOGUE

En 1926, el químico **Robert Herman BOGUE** propuso un método para calcular la composición potencial del clínker, basado en el análisis químico, en el que suponía que sólo existían en el clínker los componentes principales

Aunque sus cálculos se refieren al clínker, pueden ser ajustados para ser usados con un cemento

Pese a proporcionar solamente resultados aproximados, la formulación propuesta es muy útil y ampliamente utilizada por la industria cementera

Composición potencial

Si el cemento portland tiene la composición química siguiente, expresada en forma de óxidos:

Sustancia	%
SiO_2	S
Al_2O_3	A
Fe_2O_3	F
CaO	C
MgO	M
SO_3	Y
CO_2	D
H_2O	H
Residuo insoluble	RI
Resto	r

La composición potencial, de acuerdo con el método de **BOGUE**, se calcula a partir de las siguientes consideraciones

Composición potencial

La **sílice** que aparece como tal en el análisis es la **reactiva**, es decir, la que está combinada con la cal para formar los silicatos, la cual será la fracción de la **sílice total** que es soluble en un tratamiento con **HCl** seguido de otro en una disolución hirviente de **K(OH)**

La **cal** que figura en el análisis es la **cal total**, siendo preciso para calcular la **cal reactiva** la que estuviera en forma de **$CaCO_3$** (calculada sobre la base del contenido de **CO_2**) y la parte supuestamente combinada como **$CaSO_4$** procedente del **yeso** añadido como regulador de fraguado (calculada sobre la base del contenido de **SO_3**), así como la **cal libre** que pudiera contener, determinada analíticamente, y a la que denominamos **Z**

Composición potencial

Por tanto, la **cal reactiva** (C_R) vendrá dada por:

- Cal combinada en forma de **$CaCO_3$**:

  $CaCO_3 \rightarrow CO_2 + CaO$

$$CaO = \frac{56}{44} CO_2$$

- Cal combinada en forma de **$CaSO_4$**:

  $CaSO_4 \rightarrow SO_3 + CaO$

$$CaO = \frac{56}{80} SO_3$$

$$C_R = C - Z - \frac{56}{44} D - \frac{56}{80} Y$$

Composición potencial

El **residuo insoluble** de un cemento señala el porcentaje en peso del mismo que tratado con **HCl**, siguiendo un método normalizado, queda sin disolverse en él. Se obtiene directamente en el análisis (**RI**) y está constituido por la sílice no reactiva, las sustancias que acompañan al sulfato cálcico y a los carbonatos en el yeso, así como algún otro compuesto en forma de sal secundaria del clínker

La **pérdida al fuego** se obtiene determinando la pérdida de peso que experimenta una muestra de cemento al calentarla a una temperatura comprendida entre 900 y 1000 ºC. Está formada por la suma de las cantidades de **CO_2** y **H_2O**, las cuales se determinan de forma conjunta

$$PF = D + H$$

La composición potencial del clínker de portland es cuantitativamente diferente y, por tanto, distinto el correspondiente cálculo según que el valor del **módulo de fundentes** (**A/F**) sea mayor o menor que **0.637**

Composición potencial

Si A/F > 0.637

Los componentes potenciales del clínker son el **FAC_4**, el **AC_3** y los silicatos **SC_3** y **SC_2**, cuyos valores se obtienen de la forma siguiente:

- **Ferroaluminato tetracálcico**

Todo el **Fe_2O_3** existente está en forma de este compuesto

$$Fe_2O_3 + Al_2O_3 + 4CaO \rightarrow FAC_4$$

$$FAC_4 = \frac{486}{160} F = 3.04F$$

La cantidad de **Al_2O_3** que está en forma de **FAC_4** será $\frac{102}{160} F$

Composición potencial

- **Aluminato tricálcico**

La Al_2O_3 que no está formando parte del FAC_4, es decir,

$$A - \frac{102}{160} F$$

se encuentra en forma de AC_3

$$Al_2O_3 + 3CaO \rightarrow AC_3$$

$$AC_3 = \frac{270}{102}\left(A - \frac{102}{160} F\right) = 2.65A - 1.69F$$

Composición potencial

- **Silicatos cálcicos**

Estarán formados por la totalidad de la **sílice reactiva** y la parte de **cal reactiva** que no está formando el FAC_4 y el AC_3

CaO en forma de FAC_4 = $\frac{224}{160}F$

CaO en forma de **silicatos** = ***K***

CaO en forma de AC_3 = $\frac{168}{102}\left(A-\frac{102}{160}F\right)=\frac{168}{102}A-\frac{168}{160}F$

Composición potencial

Las reacciones entre la **cal** y la **sílice** para formar ambos silicatos son las siguientes:

$$SiO_2 + 3CaO \rightarrow SC_3$$

$$SiO_2 + 2CaO \rightarrow SC_2$$

debiendo verificarse:

$$\frac{SC_3}{228} = \frac{S_1}{60} = \frac{K_1}{168}$$

$$\frac{SC_2}{172} = \frac{S_2}{60} = \frac{K_2}{112}$$

Composición potencial

Como toda la **sílice** existente, así como toda la **cal residual**, están en forma de silicatos se habrá de cumplir también:

$$\frac{S}{60} = \frac{SC_3}{228} + \frac{SC_2}{172}$$

$$\frac{K}{56} = 3\frac{SC_3}{228} + 2\frac{SC_2}{172}$$

Resolviendo este sistema de ecuaciones, se tendrá:

$$SC_3 = 228\left(\frac{K}{56} - 2\frac{S}{60}\right)$$

$$SC_2 = 172\left(3\frac{S}{60} - \frac{K}{56}\right)$$

Composición potencial

Estos valores pueden expresarse en función de los resultados del análisis químico por medio de las fórmulas siguientes:

$$SC_3 = 4.07C_R - 7.60S - 6.72A - 1.42F$$

Composición potencial

Si A/F < 0.637

En este caso no existirá AC_3 y habrá, además de los silicatos SC_3 y SC_2, una solución sólida formada por FAC_4 y FC_2 (**ferrito bicálcico**), es decir, F_2AC_6 (**diferroaluminato hexacálcico**). Los valores de los componentes serán:

- **Diferroaluminato hexacálcico**

Toda la Al_2O_3 está en forma de FAC_4 y el Al_2O_3 sobrante formará el FC_2:

$$Fe_2O_3 + Al_2O_3 + 4CaO \rightarrow FAC_4$$

$$FAC_4 = \frac{486}{102} A = 4.76A$$

Composición potencial

Fe_2O_3 en forma de FAC_4 = $\frac{160}{102}A$

Y dado que:

$$Fe_2O_3 + 2CaO \rightarrow FC_2$$

resulta entonces:

$$FC_2 = \frac{272}{160}\left(F - \frac{160}{102}A\right) = \frac{272}{160}F - \frac{272}{102}A = 1.7F - 2.67A$$

Con lo cual:

$$F_2AC_6 = FAC_4 + FC_2 = 2.10A + 1.70F$$

Composición potencial

- **Silicatos cálcicos**

CaO en forma de **FAC_4** = $\frac{224}{102}A$

CaO en forma de **silicatos** = ***K***

CaO en forma de **FC_2** = $\frac{112}{160}\left(F - \frac{160}{102}A\right) = \frac{112}{160}F - \frac{112}{102}A$

Operando de forma idéntica a como se ha realizado en el caso anterior:

$$SC_3 = 4.07C_R - 7.60S - 4.48A - 2.88F$$

Composición potencial

Si A/F = 0.637

Se trata de un caso intermedio en el que toda la alúmina estará formando FAC_4 y no se formará nada de AC_3

EJERCICIO de APLICACIÓN

Se dispone de un cemento portland sin adiciones que contiene 1.10% de cal libre y cuya composición es:

SiO_2	20.388	SO_3	3.440
Al_2O_3	5.134	CO_2	0.220
Fe_2O_3	5.760	H_2O	1.548
CaO	61.860	RI	0.487
MgO	0.643	r	0.520

Con este cemento se fabrican 6 probetas de 4x4x16 cm las cuales, después de rotas a flexotracción, se rompen ambas mitades a compresión, la mitad de ellas a los 2 días y el resto a los 28 días, obteniéndose los resultados siguientes:

Rotura a los 2 días: 26 – 23 – 30 – 21 – 25 – 26 (MPa)
Rotura a los 28 días: 50 – 56 – 61 – 52 – 48 – 62 (MPa)

Identificar la nomenclatura de este cemento de acuerdo a la Instrucción RC – 08.

Hidratación del Cemento

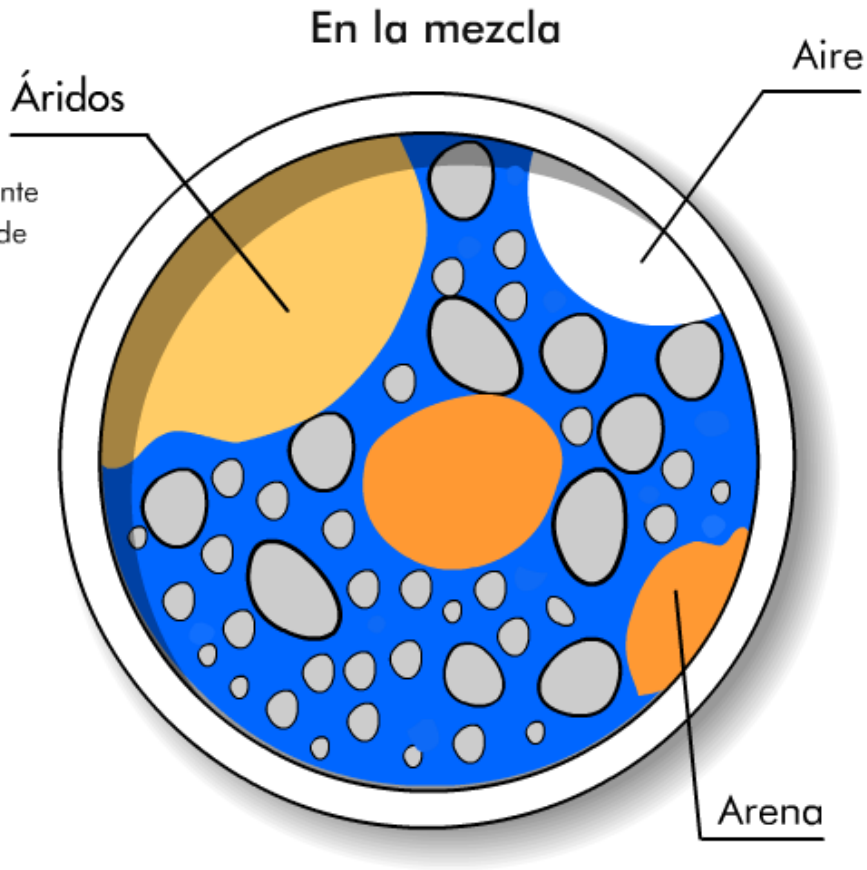
La hidratación de los cementos corrientes

La hidratación es el fenómeno químico por el que un aglomerante hidráulico fija el agua e inicia el proceso de fraguado, y luego de endurecimiento (aumento de las resistencias).

El punto de inicio se produce en la mezcla, en el momento en que se añade agua al mortero u hormigón seco.

Aquí se presenta un esquema al microscopio :
- En la mezcla
- A los 7 días
- A los 28 días

Granos de cemento agua



Diámetro de la vista al microscopio : 0,2 mm o 200 micras.

Hidratación del Cemento

La hidratación de los cementos corrientes

A los 7 días :

Los granos de cemento han empezado a disolverse, dejando en su periferia 2 hidratos:

El C-S-H (Silicato calcico hidratado)
La Portlandita (Cal hidratada)

Otros hidratos (del tipo Aluminado cálcico) se forman también en edad temprana y participan en el aumento de la resistencia

Granos de cemento · Agua · C-S-H · Portlandita
Hidratos

Diámetro de la vista al microscopio : 0,2 mm o 200 micras.

Hidratación del Cemento

La hidratación de los cementos corrientes

A los 28 días :

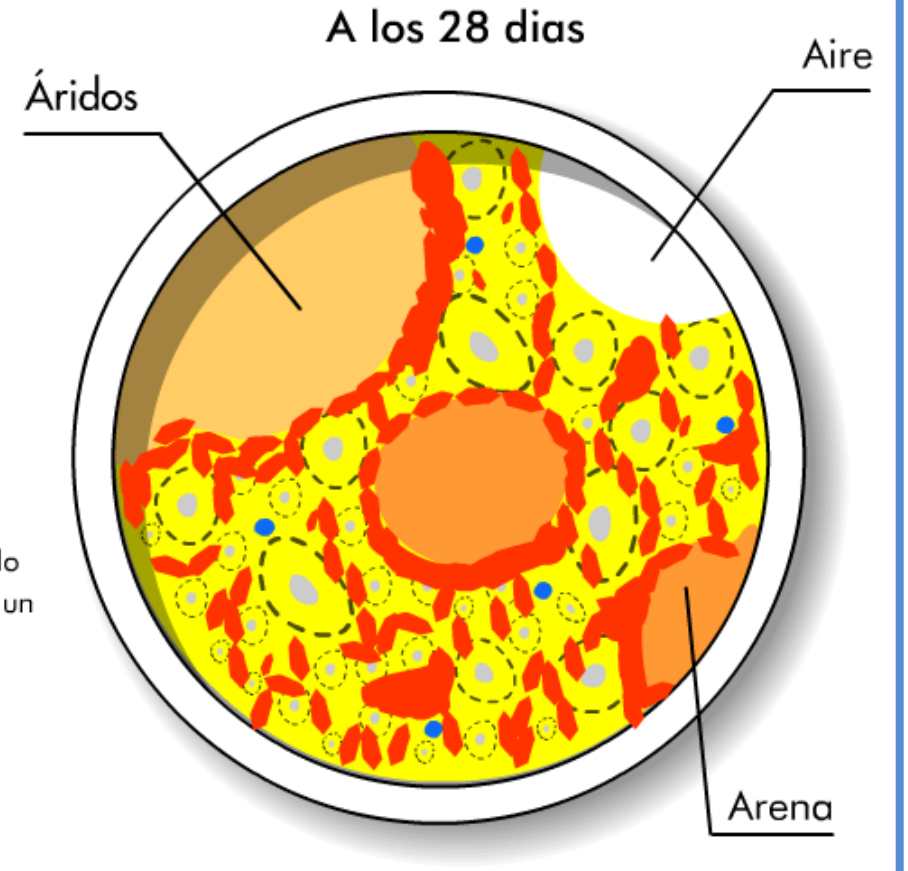
El desarrollo de los hidratos ha continuado, reduciendo el tamaño de los granos de cemento.

Los hidratos forman una masa compacta y homogénea que asegura las propiedades mecánicas del hormigón.

A continuación, el agua residual sigue desapareciendo, dando lugar a la microporosidad (por lo que es importante no poner un exceso de agua en los morteros y los hormigones).

Granos de cemento | Agua | C-S-H | Portlandita

Hidratos



Diámetro de la vista al microscopio : 0,2 mm o 200 micras.

Adiciones

Composición

La trituración y luego la cocción a 1.450°C de una mezcla de caliza y de arcilla proporciona el llamado **clinker**. Los cementos corrientes (CEM) se fabrican por mezcla y trituración de clinker y de otros **componentes minerales** con cierta cantidad de sulfato cálcico, como el yeso (necesario para regular el fraguado) y **aditivos** en baja proporción (< 0,5%).

CEM III
Cemento de alto horno

CEM IV
Cemento puzolánico

CEM V
Cemento de escoria y cenizas

CEM II
Cemento Portland compuesto

CEM I
Cemento Portland

Tipos

Los cementos corrientes están agrupados en **cinco tipos principales**

Sin adiciones

CEM I

Cemento Portland

Composición definida por la norma EN 197-1

Las exigencias referentes a la composición hacen referencia a la suma de los componentes principales y secundarios. El producto final debe ser entendido como la suma de los componentes principales y secundarios, más el sulfato cálcico necesario y todos los aditivos.

Notación		Composición (porcentaje en masa) Constituyentes principales									Componentes secundarios
Tipos de cemento corriente		Clinker	Escoria de alto horno	Humo de sílice	Puzolanas		Cenizas volantes		Esquisto calcinado	Caliza	
					Natural	Natural calcinada	Silícea	Cálcica			
		K	S	D	P	Q	V	W	T	L	LL	
Cemento Portland	CEM I	95-100									0-5

Sin adiciones

Clínker de cemento portland (K): debe estar constituido al menos en dos tercios de su masa por silicatos de calcio (SC_3 + SC_2) y el resto por combinaciones de óxido de aluminio, óxido de hierro y otros óxidos. La relación en masa CaO/SiO_2 no será menor de 2.0. El contenido de óxido de magnesio (MgO) no excederá del 5.0% en masa

Adiciones

CEM II
Cemento Portland compuesto

Composición definida por la norma EN 197-1

Las exigencias referentes a la composición hacen referencia a la suma de los componentes principales y secundarios. El producto final debe ser entendido como la suma de los componentes principales y secundarios, más el sulfato cálcico necesario y todos los aditivos.

Notación Tipos de cemento corriente		Composición (porcentaje en masa) Constituyentes principales										Componentes secundarios
		Clinker	Escoria de alto horno	Humo de sílice	Puzolanas		Cenizas volantes		Esquisto calcinado	Caliza		
					Natural	Natural calcinada	Silícea	Cálcica				
		K	S	D	P	Q	V	W	T	L	LL	
Cemento Portland con escoria	CEM II/A-S	80-94	6-20									0-5
	CEM II/B-S	65-79	21-35									0-5
Cemento Portland con humo de silice	CEM II/A-D	90-94		6-10								0-5
Cemento Portland con puzolana	CEM II/A-P	80-94			6-20							0-5
	CEM II/B-P	65-79			21-35							0-5
	CEM II/A-Q	80-94				6-20						0-5
	CEM II/B-Q	65-79				21-35						0-5
Cemento Portland con cenizas volantes	CEM II/A-V	80-94					6-20					0-5
	CEM II/B-V	65-79					21-35					0-5
	CEM II/A-W	80-94						6-20				0-5
	CEM II/B-W	65-79						21-35				0-5
Cemento Portland con esquisto calcinado	CEM II/A-T	80-94							6-20			0-5
	CEM II/B-T	65-79							21-35			0-5
Cemento Portland con caliza	CEM II/A-L	80-94								6-20		0-5
	CEM II/B-L	65-79								21-35		0-5
	CEM II/A-LL	80-94									6-20	0-5
	CEM II/B-LL	65-79									21-35	0-5
Cemento Portland compuesto	CEM II/A-M	80-94	← 6-20 →									0-5
	CEM II/B-M	65-79	← 21-35 →									0-5

Adiciones

Escoria granulada de horno alto (S): se obtiene por enfriamiento rápido de la escoria en estado de fusión procedente de la fabricación del acero en el proceso de horno alto y presenta, al menos en dos tercios de su masa, estructura vítrea. Es un material hidráulico latente, es decir, posee propiedades hidráulicas cuando se activa de manera adecuada

- $CaO + MgO + SiO_2 \geq 66.6\%$
- $(CaO + MgO)/SiO_2 > 1$

Adiciones

Materiales puzolánicos (P, Q): son sustancias naturales o industriales silíceas o silicoaluminosas, o una combinación de ambas. No endurecen por sí mismos cuando se amasan con agua, pero finamente molidos, reaccionan, en presencia de agua, a la temperatura ambiente con el hidróxido de calcio disuelto para formar compuestos de silicato de calcio y de silicoaluminato de calcio, que son capaces de desarrollar resistencias (puzolanicidad)

Las puzolanas constarán, esencialmente, de SiO_2 reactivo y Al_2O_3. El resto estará formado por Fe_2O_3 y otros óxidos. El contenido de SiO_2 reactivo no será menor del **25%** en masa

Puzolana natural (P): material de origen volcánico o rocas sedimentarias con composición química y mineralógica adecuadas

Puzolana natural calcinada (Q): material de origen volcánico, arcillas, esquistos o rocas sedimentarias activadas por tratamiento térmico

Adiciones

Puzolana natural (P)

Adiciones

Cenizas volantes (V, W): se obtienen por precipitación electrostática o mecánica de partículas pulverulentas arrastradas por los flujos gaseosos de calderas alimentadas con carbón pulverizado. Las cenizas obtenidas por otros métodos no deben emplearse como componentes para el cemento

- Pérdida por calcinación (P.F.) < **5.0%**
- Si **5.0 < P.F. < 7.0%** deberá cumplir exigencias particulares de durabilidad

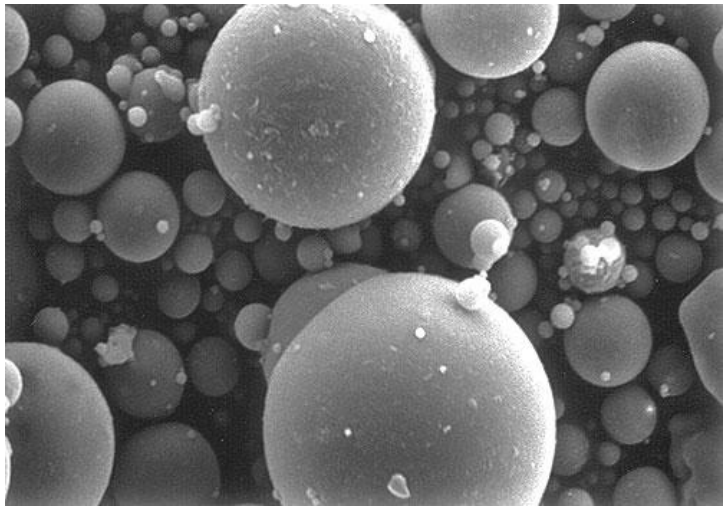
Cenizas volantes silíceas (V): polvo fino de partículas esféricas que tiene propiedades puzolánicas. Consta, esencialmente, de **SiO_2 reactiva** (> **25%**) y **Al_2O_3**. El resto contiene **Fe_2O_3** y otros óxidos. La proporción de **CaO reactiva** será menor del **10%** en masa y de **CaO libre** inferior al **1.0%**

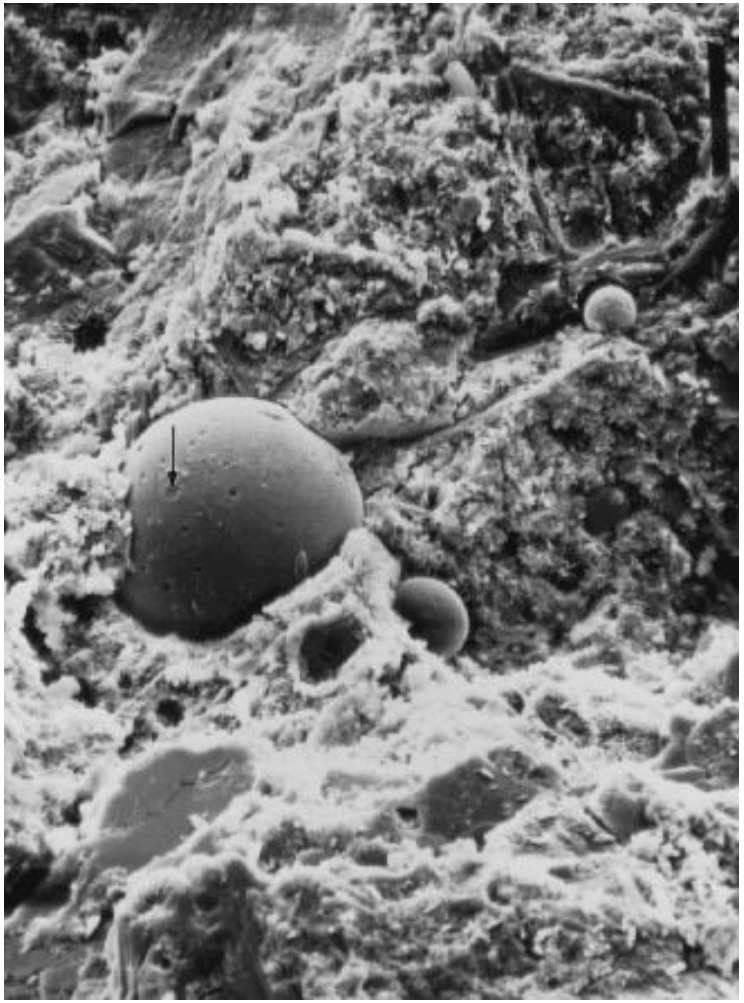
Cenizas volantes calcáreas (W): polvo fino que tiene propiedades hidráulicas y/o puzolánicas. Consta, esencialmente, de **CaO reactiva**, **SiO_2 reactiva** y **Al_2O_3**. El resto contiene **Fe_2O_3** y otros óxidos

- **CaO reactiva** > **10.0%**
- Si **10.0<CaO reactiva<15.0%**, el contenido de **SiO_2 reactiva** > **25%**

Adiciones

Cenizas volantes

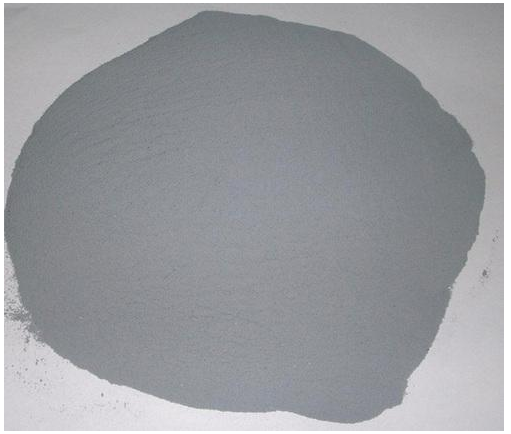


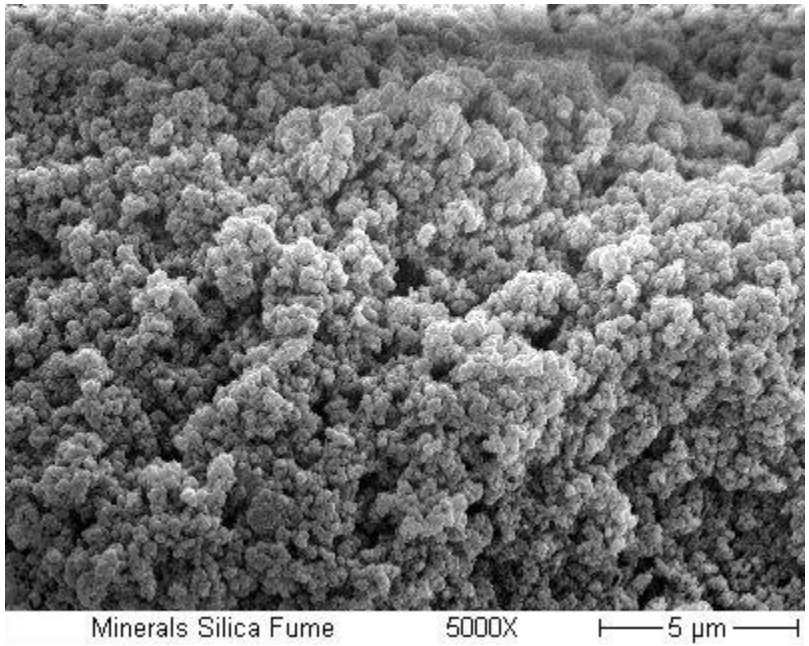


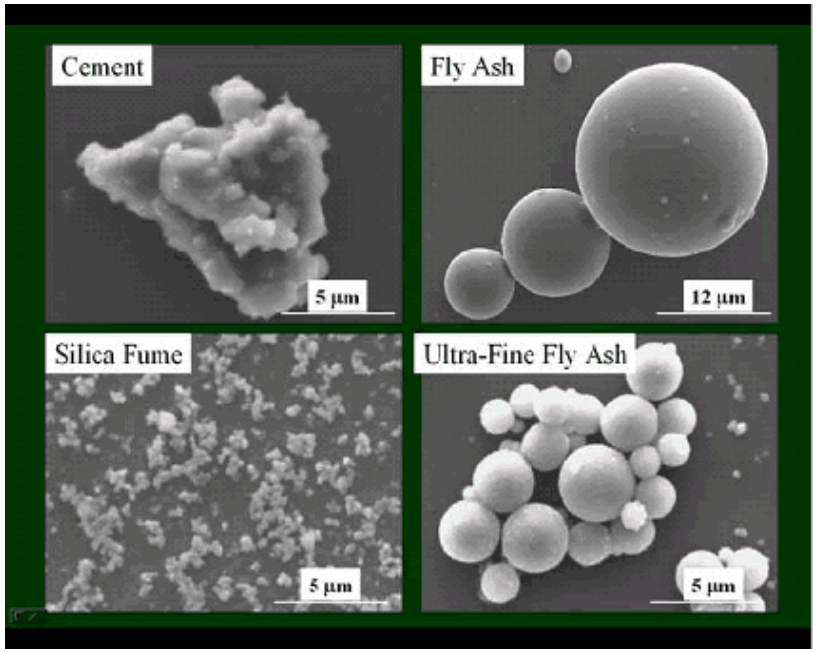
Adiciones

Humo de sílice ó microsílice (D): se origina por la reducción de cuarzo de elevada pureza con carbón en hornos de arco eléctrico utilizados para la producción de silicio y aleaciones de ferrosilicio. Consiste en partículas esféricas muy finas, que contienen **SiO_2 > 85.0%**

- Pérdida por calcinación (**P.F.**) < **4.0%**
- Superficie específica (**BET**) ≥ **15 m^2/g**







Adiciones

Esquisto calcinado (T): se produce en un horno especial a temperaturas de aproximadamente **800ºC**. Está formado, principalmente, por **silicato bicálcico** y **aluminato monocálcico**, conteniendo pequeñas cantidades de **CaO libre** y de **sulfato de calcio**, junto con mayores proporciones de óxidos puzolánicamente reactivos, especialmente el **SiO_2**. Posee, por tanto, propiedades hidráulicas y puzolánicas

- Resistencia a compresión ≥ **25 MPa** a los 28 días
- Expansión < **10 mm**, usando una mezcla 30/70 de esquisto calcinado y cemento tipo CEM I

Adiciones

Caliza (L, LL): como componente del cemento, debe cumplir:

- **$CaCO_3$** ≥ **75%** en masa
- Arcilla < **1.20 g/100 g**
- Carbono orgánico total < **0.20%** (LL) ó < **0.50%** (L)

Adiciones

CEM III
Cemento de alto horno

Composición definida por la norma EN 197-1

Las exigencias referentes a la composición hacen referencia a la suma de los componentes principales y secundarios. El producto final debe ser entendido como la suma de los componentes principales y secundarios, más el sulfato cálcico necesario y todos los aditivos.

Notación Tipos de cemento corriente		Composición (porcentaje en masa) Constituyentes principales										Componentes secundarios
		Clinker	Escoria de alto horno	Humo de sílice	Puzolanas		Cenizas volantes		Esquisto calcinado	Caliza		
					Natural	Natural calcinada	Silícea	Cálcica				
		K	S	D	P	Q	V	W	T	L	LL	
Cemento de alto horno	CEM III/A	35-64	36-65									0-5
	CEM III/B	20-34	66-80									0-5
	CEM III/C	5-19	81-95									0-5

Adiciones

CEM IV
Cemento puzolánico

Composición definida por la norma EN 197-1

Las exigencias referentes a la composición hacen referencia a la suma de los componentes principales y secundarios. El producto final debe ser entendido como la suma de los componentes principales y secundarios, más el sulfato cálcico necesario y todos los aditivos.

Notación Tipos de cemento corriente		Composición (porcentaje en masa) Constituyentes principales										Componentes secundarios
		Clinker	Escoria de alto horno	Humo de sílice	Puzolanas		Cenizas volantes		Esquisto calcinado	Caliza		
					Natural	Natural calcinada	Silícea	Cálcica				
		K	S	D	P	Q	V	W	T	L	LL	
Cemento puzolánico	CEM IV/A	65-89		← 11-35 →								0-5
	CEM IV/B	45-64		← 36-55 →								0-5

Adiciones

CEM V
Cemento compuesto

Composición definida por la norma EN 197-1

Las exigencias referentes a la composición hacen referencia a la suma de los componentes principales y secundarios. El producto final debe ser entendido como la suma de los componentes principales y secundarios, más el sulfato cálcico necesario y todos los aditivos.

Notación Tipos de cemento corriente		Composición (porcentaje en masa) Constituyentes principales									Componentes secundarios
		Clinker	Escoria de alto horno	Humo de sílice	Puzolanas		Cenizas volantes		Esquisto calcinado	Caliza	
					Natural	Natural calcinada	Silícea	Cálcica			
		K	S	D	P	Q	V	W	T	L	LL	
Cemento compuesto	CEM V/A	40-64	18-30		← 18-30 →						0-5
	CEM V/B	20-38	31-50		← 31-50 →						0-5

Otros componentes

Sulfato de calcio: se añade a los demás componentes del cemento durante su fabricación, para controlar el fraguado. Puede estar en forma de **dihidrato**, **hemihidrato** o **anhidrita**

Aditivos: son componentes que se añaden para mejorar la fabricación o las propiedades del cemento. La cantidad total de los mismos no excederá del **1.0%** en masa

Características físicas

EXIGENCIAS MECÁNICAS Y FÍSICAS DE LOS CEMENTOS COMUNES							
Clase resistente	Resistencia a compresión (N/mm^2)				Tiempo de fraguado		Expansión (mm)
	Resistencia inicial		Resistencia nominal		Inicio (minutos)	Final (horas)	
	2 días	7 días	28 días				
32,5N	—	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 12	≤ 10
32,5R	≥ 10,0	—					
42,5N	≥ 10,0	—	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60		
42,5R	≥ 20,0	—					
52,5N	≥ 20,0	—	≥ 52,5	—	≥ 45		
52,5R	≥ 30,0	—					

Resistencia a la compresión

El método utilizado consiste en la determinación en mortero de las resistencias a la compresión (y accesoriamente a la flexión) de probetas de dimensiones 4 cm x 4 cm x 16 cm; estas probetas están formadas por una mezcla de cemento y arena normalizada en proporción 1/3 y una relación agua / cemento = 0,5 para los cementos corrientes

El tiempo de mezclado requerido para la elaboración de estas probetas es de 4 minutos para los cementos corrientes

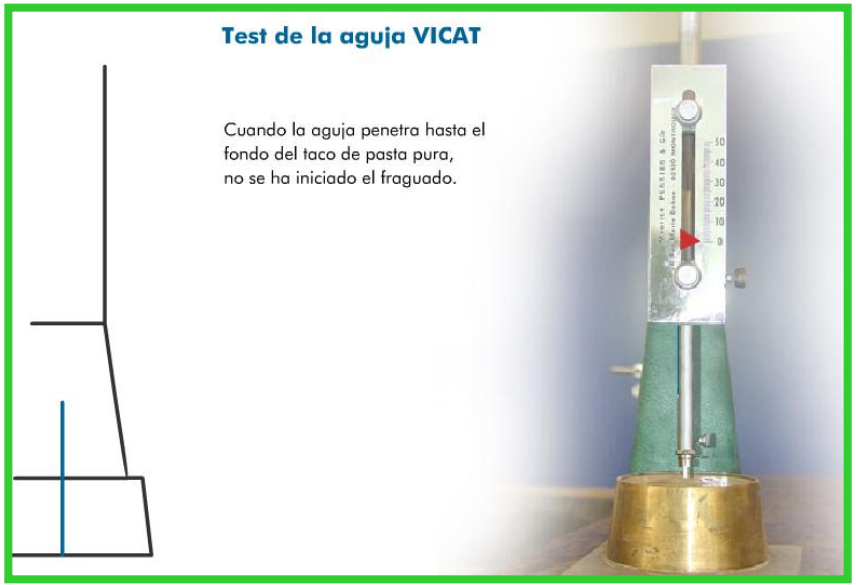
Las probetas se preparan en un lugar a 20ºC /+/- 2ºC) y al 50% mínimo de humedad relativa.

Después de 24 horas, se desmoldean y se conservan en el agua a 20ºC.

En la fecha definida se rompen en dos mitades y luego cada mitad se somete al ensayo de compresión.

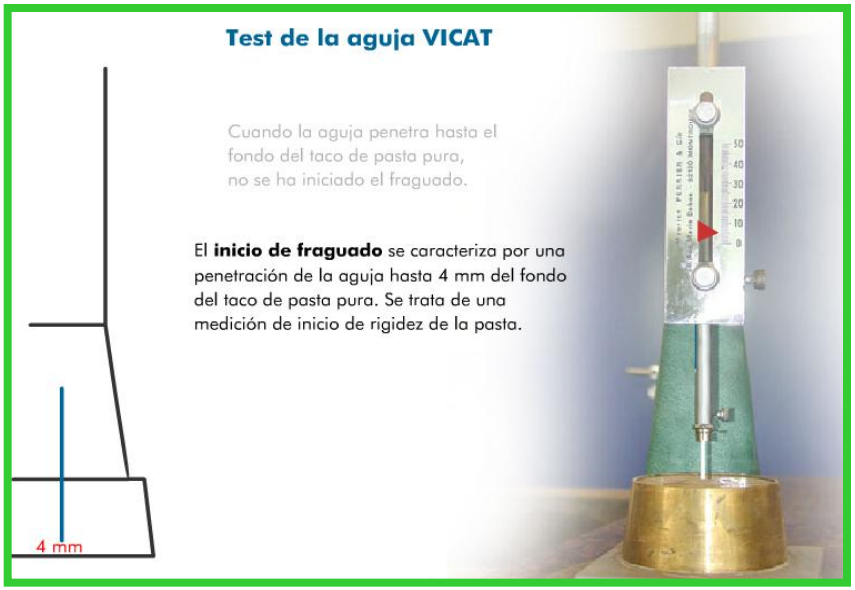
Características físicas

EXIGENCIAS MECÁNICAS Y FÍSICAS DE LOS CEMENTOS COMUNES							
Clase resistente	Resistencia a compresión (N/mm^2)				Tiempo de fraguado		Expansión (mm)
	Resistencia inicial		Resistencia nominal		Inicio (minutos)	Final (horas)	
	2 días	7 días	28 días				
32,5N	—	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 12	≤ 10
32,5R	≥ 10,0	—					
42,5N	≥ 10,0	—	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60		
42,5R	≥ 20,0	—					
52,5N	≥ 20,0	—	≥ 52,5	—	≥ 45		
52,5R	≥ 30,0	—					



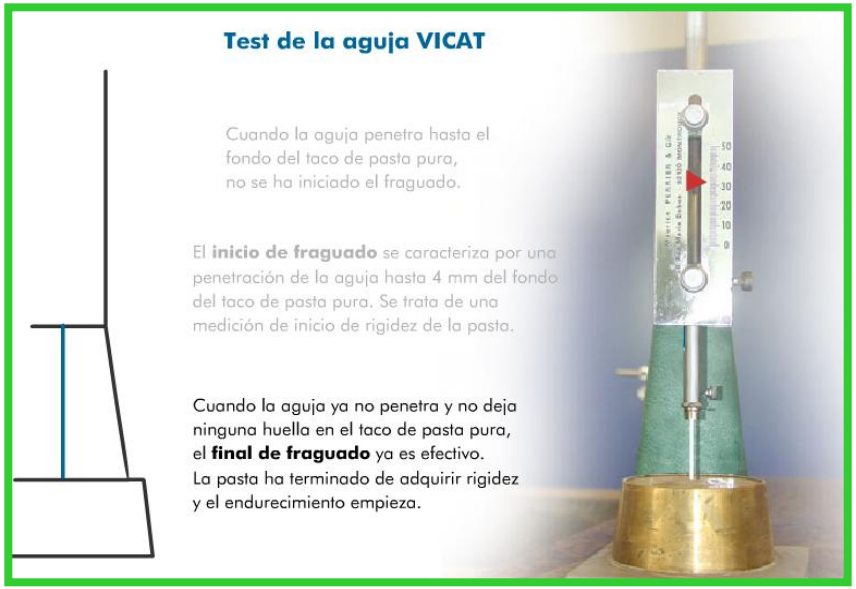
Características físicas

EXIGENCIAS MECÁNICAS Y FÍSICAS DE LOS CEMENTOS COMUNES							
Clase resistente	Resistencia a compresión (N/mm^2)				Tiempo de fraguado		Expansión (mm)
	Resistencia inicial		Resistencia nominal		Inicio (minutos)	Final (horas)	
	2 días	7 días	28 días				
32,5N	—	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 12	≤ 10
32,5R	≥ 10,0	—					
42,5N	≥ 10,0	—	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60		
42,5R	≥ 20,0	—					
52,5N	≥ 20,0	—	≥ 52,5	—	≥ 45		
52,5R	≥ 30,0	—					



Características físicas

EXIGENCIAS MECÁNICAS Y FÍSICAS DE LOS CEMENTOS COMUNES							
Clase resistente	Resistencia a compresión (N/mm^2)				Tiempo de fraguado		Expansión (mm)
	Resistencia inicial		Resistencia nominal		Inicio (minutos)	Final (horas)	
	2 días	7 días	28 días				
32,5N	—	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 12	≤ 10
32,5R	≥ 10,0	—					
42,5N	≥ 10,0	—	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60		
42,5R	≥ 20,0	—					
52,5N	≥ 20,0	—	≥ 52,5	—	≥ 45		
52,5R	≥ 30,0	—					



Características físicas

EXIGENCIAS MECÁNICAS Y FÍSICAS DE LOS CEMENTOS COMUNES							
Clase resistente	Resistencia a compresión (N/mm^2)				Tiempo de fraguado		Expansión (mm)
	Resistencia inicial		Resistencia nominal		Inicio (minutos)	Final (horas)	
	2 días	7 días	28 días				
32,5N	—	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 12	≤ 10
32,5R	≥ 10,0	—					
42,5N	≥ 10,0	—	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60		
42,5R	≥ 20,0	—					
52,5N	≥ 20,0	—	≥ 52,5	—	≥ 45		
52,5R	≥ 30,0	—					

Expansión

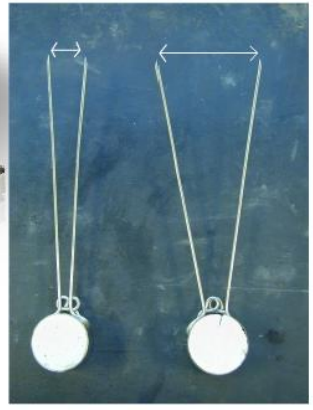
Este ensayo tiene como finalidad determinar la hinchazón de una pasta pura en entorno húmedo cuando los cementos tienen una cantidad demasiado grande de componentes expansivos (yeso, cal libre, magnesio libre) peligrosos para la perennidad de las obras.

Estas medidas de expansión se realizan gracias a agujas de Le Chatelier normalizadas. El cemento a estudiar se mezcla a consistencia normal y luego se introduce en el interior de pequeños moldes que son conservados 24 horas en agua a 20°C.

El ensayo consiste en medir el aumento de la separación (en mm) de las dos agujas entre el tiempo final y el inicial de la operación.

La medida final se efectúa después de 7 días en frío, o después de 3 horas de ebullición en caliente.

Agujas de Le Chatelier.



Características químicas

EXIGENCIAS QUÍMICAS DE LOS CEMENTOS				
Propiedades	**Ensayo de referencia**	**Tipo de cemento**	**Clase de resistencia**	**Exigencia**
Pérdida por calcinación	UNE-EN 196-2	CEM I CEM III	Todas	5,0 %
Residuo insoluble	UNE-EN 196-2 Capítulo 9	CEM I CEM III	Todas	5,0 %
Sulfato (SO_3)	UNE-EN 196-2	CEM I CEM II CEM IV CEM V	32,5 N 32,5 R 42,5 N	3,5 %
			42,5 R 52,5 N 52,5 R	4,0 %
		CEM III	Todas	
Cloruros	UNE 80 217	Todos	Todas	0,10 %
Puzolanicidad	UNE-EN 196-5	CEM IV	Todas	Satisfacer el ensayo

Otros cementos

A) CEMENTOS COMUNES CON CARACTERÍSTICAS ADICIONALES

A1) Cementos resistentes a los sulfatos (SR)

A2) Cementos resistentes al agua de mar (MR)

CEMENTOS RESISTENTES A LOS SULFATOS Y AL AGUA DE MAR				
Tipo	Resistentes a los sulfatos		Resistentes al agua de mar	
	C_3A %	$C_3A + C_4AF$ %	C_3A %	$C_3A + C_4AF$ %
CEM I	≤ 5,0	≤ 22,0	≤ 5,0	≤ 22,0
CEM II/A-S	≤ 6,0	≤ 22,0	≤ 8,0	≤ 25,0
CEM II/B-S				
CEM II/A-D				
CEM II/A-P				
CEM II/B-P				
CEM II/A-V				
CEM II/B-V				
CEM III/A	≤ 8,0	≤ 25,0	≤ 10,0	≤ 25,0
CEM III/B	Lo son siempre		Lo son siempre	
CEM III/C	Lo son siempre		Lo son siempre	
CEM IV/A	≤ 6,0	≤ 22,0	≤ 8,0	≤ 25,0
CEM IV/B	≤ 8,0	≤ 25,0	≤ 10,0	≤ 25,0
CEM V/A	≤ 8,0	≤ 25,0	≤ 10,0	≤ 25,0

A3) Cementos de bajo calor de hidratación (BC): aquellos cementos comunes que, a la edad de **5 días**, desarrollan un calor de hidratación igual o inferior a **272 J/g** (**65 cal/g**)

Otros cementos

B) CEMENTOS BLANCOS (BL): aquellos cementos comunes que cumplan que su índice de blancura (parámetro "L") sea igual o mayor que **85.0**

C) CEMENTOS DE ALBAÑILERÍA (MC): están compuestos por clínker de portland, constituyentes inorgánicos y, en algunos casos, aditivos

COMPOSICIÓN DE LOS CEMENTOS DE ALBAÑILERÍA		
Tipo y clase resistente	Contenido (% en masa)	
	Clínker de portland	Aditivos
MC 5	≥ 25	≤ 1
MC 12,5	≥ 40	≤ 1
MC 12,5 X		
MC 22,5 X		
BL 22,5 X		

PRESCRIPCIONES PARA MORTERO FRESCO		
Tipo y clase de resistencia	Contenido de aire UNE-EN 413-2	Retención de agua UNE-EN 413-2
	% en volumen	% en masa
MC 5	≥ 8 ≤ 22	≥ 80
MC 12,5		
MC 12,5 X	—	≥ 75
MC 22,5 X		
BL 22,5 X		

PRESCRIPCIONES MECÁNICAS Y FÍSICAS DE LOS CEMENTOS DE ALBAÑILERÍA							
Tipo y clase de resistencia	Resistencia a compresión (N/mm^2) UNE-EN 196-1			Tiempo de fraguado UNE-EN 196-3		Finura sobre tamiz 90 µm UNE 80122	Estabilidad de volumen UNE-EN 196-3
	7 días	28 días		Inicio (minutos)	Final (horas)	Residuo (%)	Expansión (mm)
MC 5	—	≥ 5,0	≤ 15,0	≥ 60	≤ 15	≤ 15	≤ 10
MC 12,5	≥ 7,0	≥ 12,5	≤ 32,5				
MC 12,5 X	≥ 7,0	≥ 12,5	≤ 32,5				
MC 22,5 X	≥ 10,0	≥ 22,5	≤ 42,5				
BL 22,5 X	≥ 10,0	≥ 22,5	≤ 42,5				

Otros cementos

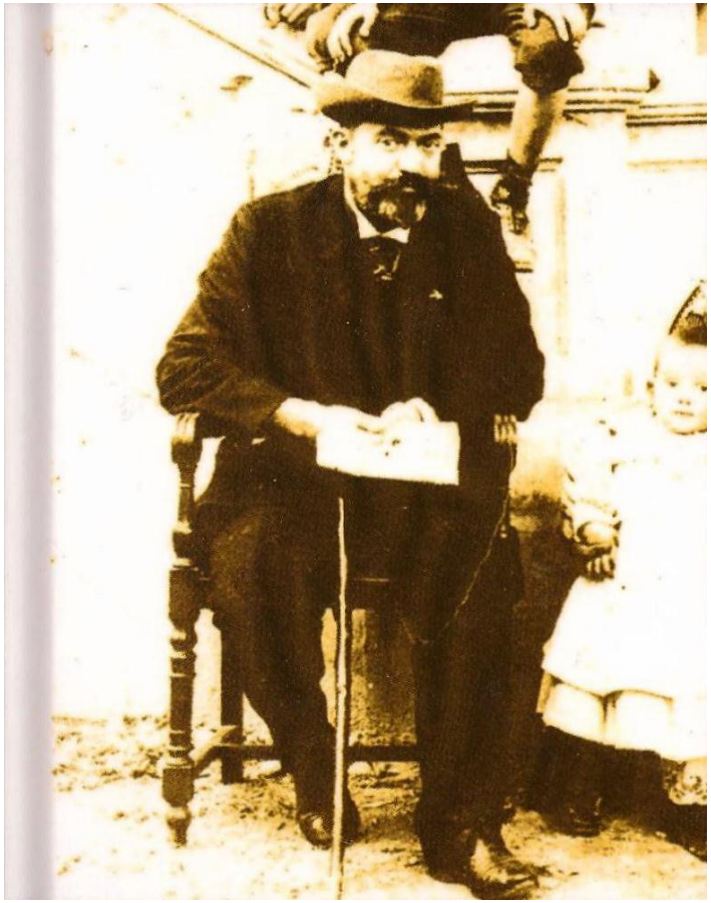
D) CEMENTOS PARA USOS ESPECIALES (ESP)

TIPO DE CEMENTO PARA USOS ESPECIALES						
Tipo de cemento	Designación	Clínker	Escoria de horno alto	Puzolana natural	Ceniza volante	Componentes adicionales
ESP VI-1	VI-1	25 - 55	45 - 75			0 - 5

PRESCRIPCIONES MECÁNICAS Y FÍSICAS DEL CEMENTO DE USOS ESPECIALES						
Clase resistente	Resistencia a compresión (N/mm^2)			Tiempo de fraguado		Estabilidad
	28 días		90 días	Principio (minutos)	Final (horas)	Expansión (mm)
22,5 N	≥ 12,5	≤ 32,5	≥ 22,5	≥ 60	≤ 12	≤ 10
32,5 N	≥ 22,5	≤ 42,5	≥ 32,5			
42,5 N	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 42,5			

Otros cementos

E) **CEMENTO DE ALUMINATO DE CALCIO (CAC)**: fue patentado en 1908 por el químico francés **Jules BIED**



Inicialmente es concebido para combatir el ataque por sulfatos detectado a principios del siglo XX en diversas obras del sur de Francia en las que se utilizaron hormigones fabricados con cemento portland

Durante la Primera Guerra Mundial se utilizó en la construcción de búnkeres y emplazamientos para armas

Tras la Segunda Guerra Mundial (1945 – 1973) se utilizó ampliamente en las tareas de reconstrucción debido a sus propiedades de rápido endurecimiento

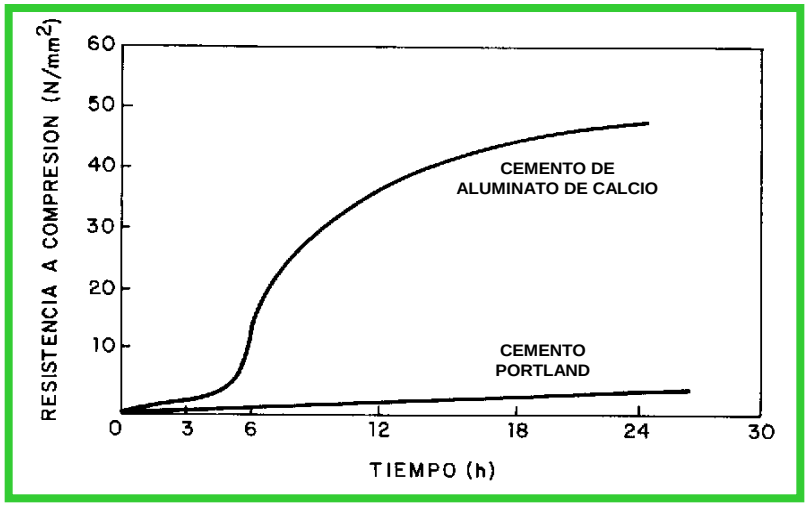
Otros cementos

Está compuesto únicamente por **clínker aluminoso**, obtenido por fusión o sinterización a partir de una mezcla exactamente definida de materiales aluminosos y calcáreos

El principal componente es el **aluminato monocálcico** (**AC**). Como componentes minoritarios contiene, entre otros, **alumino-ferritos de calcio**, **silicato bicálcico** y **silico-aluminato de calcio**

ESPECIFICACIONES QUÍMICAS DEL *CAC*		
Característica	**Método de ensayo**	**Especificación (% masa)**
Alúmina (Al_2O_3)	UNE-EN 196-2	$36 \leq Al_2O_3 \leq 55$
Sulfuro (S^{2-})	UNE-EN 196-2	$\leq 0{,}10$
Cloruro	UNE 80217	$\leq 0{,}10$
Álcalis	UNE 80217	$\leq 0{,}40$
Sulfato (SO_3)	UNE-EN 196-2	$\leq 0{,}50$

ESPECIFICACIONES FÍSICO-MECÁNICAS DEL *CAC*			
Resistencia a compresión (N/mm^2)		Tiempo de fraguado	
A las 6 horas	A las 24 horas	Inicio (minutos)	Final (horas)
≥ 20	≥ 40	≥ 60	≤ 12



Designación de los Cementos

Designaciones normalizadas

Los cementos corrientes (CEM) deben ser identificados como mínimo por el tipo de cemento, seguido de los números 32,5 - 42,5 ó 52,5 que indican la clase de resistencia.
Además, para indicar la clase de resistencia a corto plazo, se añade la letra N o la letra R, según el caso.

Ejemplo 1

Un cemento Portland del tipo CEM I, conforme a la norma EN 197-1, que pertenezca a la clase de resistencia 52,5 y que tenga una resistencia a corto plazo alta, estará identificado por : Cemento Portland EN 197-1 - CEM I 52,5 R

Ejemplo 2

Un cemento Portland de tipo CEM I, conforme a la norma EN 197-1, que pertenezca a la clase de resistencia 42,5 y que presente una resistencia a corto plazo ordinaria, estará identificado por : Cemento Portland EN 197-1 - CEM I 42,5 N

A la designación pueden ser añadidas otras características referidas especialmente a la composición más detallada del cemento :

Ejemplo 3

Un cemento Portland de caliza, con un contenido entre 6 y 20% de masa de caliza (L), que pertenezca a una clase de resistencia 32,5 y que presente una resistencia a corto plazo ordinaria, estará identificado por :

Cemento Portland de caliza EN 197-1 - CEM II/A-L 32,5 N

Ejemplo 4

Un cemento Portland compuesto, que contenga en total una cantidad de escoria granulada de alto horno (S), cenizas volátiles silíceas (V) y caliza (L) entre un 6 y un 20% en masa, que pertenezca a la clase de resistencia 42,5 y que presente una clase de resistencia a corto plazo alta, estará identificado por :

Cemento Portland compuesto EN 197-1 - CEM II/A-M (S-V-L) 42,5 R

Propiedades de los Cementos

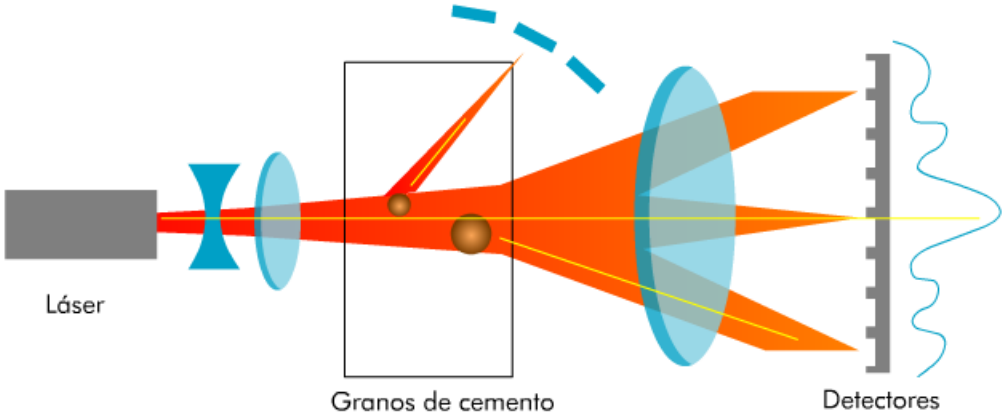
Finura de molido: se evalúa mediante distintos parámetros

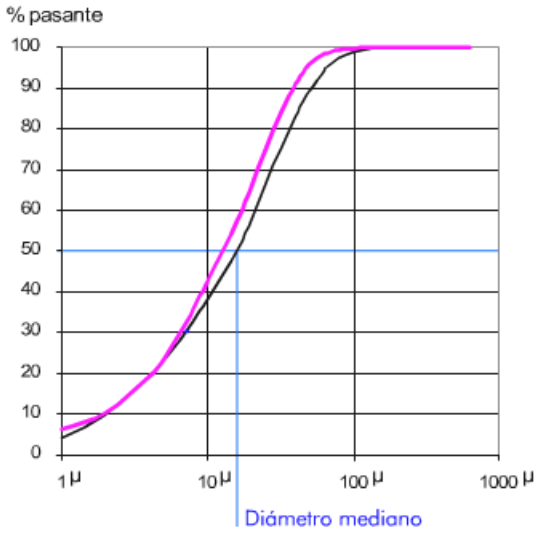
- Superficie específica (método Blaine, método BET)
- Tamaño medio (granulometría láser)

Finura

Principio del granulómetro de dispersión de rayo láser

La luz procedente del láser la difunden los granos. Unos detectores miden la luz difundida. Un tratamiento matemático de las señales calcula la distribución granulométrica. La curva granulométrica así definida se caracteriza por un parámetro de dispersión (la pendiente de la curva) y por un parámetro de centrado : el **diámetro mediano** (diámetro en relación con el que el 50% de la materia es de tamaño inferior y el 50% restante de tamaño superior).





Curvas granulométricas

Propiedades de los Cementos

Finura de molido: se evalúa mediante distintos parámetros

- Superficie específica (método Blaine, método BET)
- Tamaño medio (granulometría láser)

Finura

Tradicionalmente, la finura del cemento se evalúa por medio de la "**superficie específica Blaine**" : este parámetro, expresado en cm^2/gramo, representa bastante bien la superficie desarrollada por el conjunto de los granos para una cantidad determinada de polvo ; está vinculado directamente a la reactividad del cemento.

Principio y funcionamiento del permeabilímetro Blaine

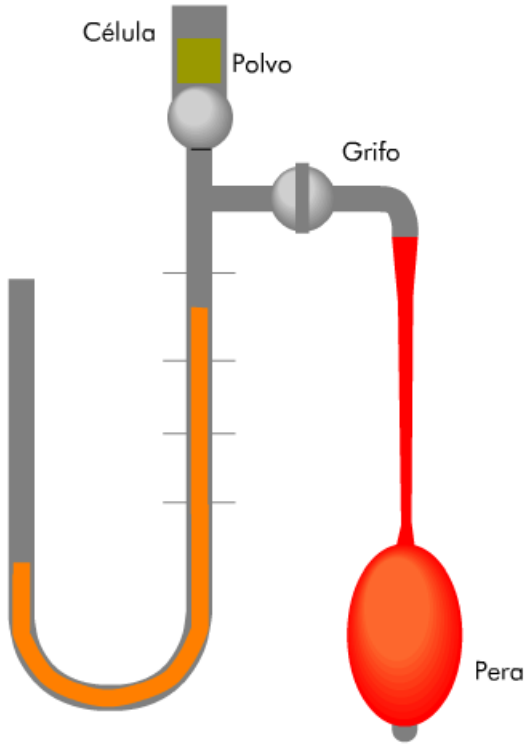
Se trata de una medición indirecta definida por el tiempo que tarda un volumen de aire determinado en atravesar una capa definida de polvo :

1) Carga del polvo en la célula

2) Creación del vacío bajo la célula utilizando una pera

3) Cierre del grifo

4) El líquido del tubo en U equilibra sus niveles; se cronometra el tiempo que tarda en bajar desde una graduación a la siguiente.



Propiedades de los Cementos

Densidad: varía muy poco de unos cementos a otros, oscilando entre **3** y **3.2 g/cm^3**

Se determina por **picnometría**, utilizando el llamado **volumenómetro de Le Chatelier**

Propiedades de los Cementos

Calor de hidratación: para cementos portland comunes, se ha comprobado que la mitad del calor total se libera entre el primer y el tercer día, en torno al 75% a los siete días y hasta un 95% en seis meses

Calor de hidratación

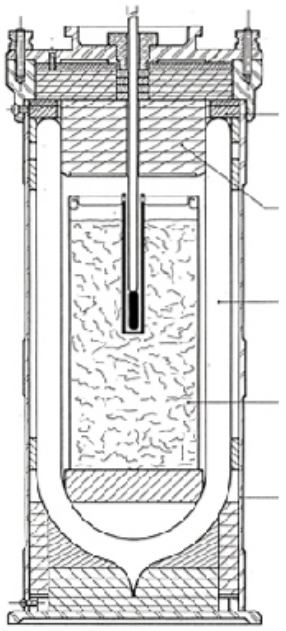
La reacción de hidratación del cemento es exotérmica.

Este ensayo tiene como finalidad medir de manera continua el calor de hidratación de los cementos en tiempos cortos (los primeros días); la cantidad de calor desprendida se expresa en Joules por gramo de cemento (J/g).

El método del calorímetro de Langavant (también llamado botella aislante) consiste en introducir una masa fija de mortero en un vaso de Dewar para deducir la cantidad de calor desprendida a partir de la evolución de la temperatura.

La temperatura ambiental así como la de los productos mezclados debe ser de 20°C.

Un programa informático permite tomar las medidas en modo instantáneo y asegura el tratamiento de los datos al final del ensayo.



Vaso de Dewar.

Propiedades de los Cementos

Retracción: disminución de volumen con el transcurso del tiempo

Retracción

Los ensayos de retracción consisten en medir, en función del tiempo, la variación de longitud de probetas prismáticas de mortero conservada en el aire (20°C, 50% de humedad relativa).

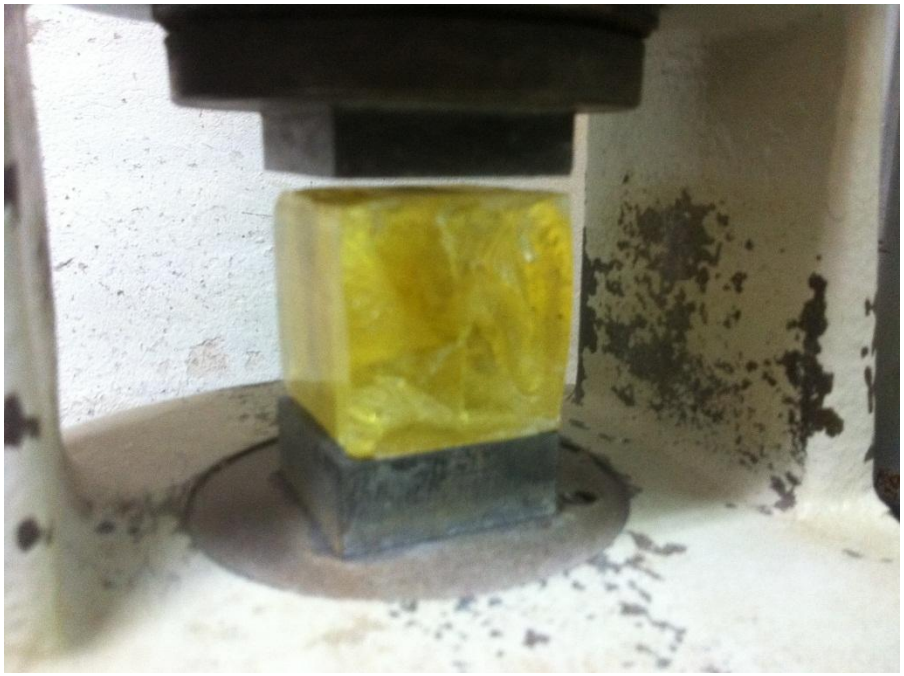
Los moldes se perforan en conformidad con la norma en cada extremo para permitir la fijación de los plots destinados a las mediciones. Los plots deben ser calibrados y constituidos de materia no reactiva al aglomerante.

El aparato de medición recibe el nombre de retractómetro. Permite, por comparación con una barra patrón de longitud invariable, determinar la longitud inicial de las probetas y seguir la evolución en las fechas deseadas.

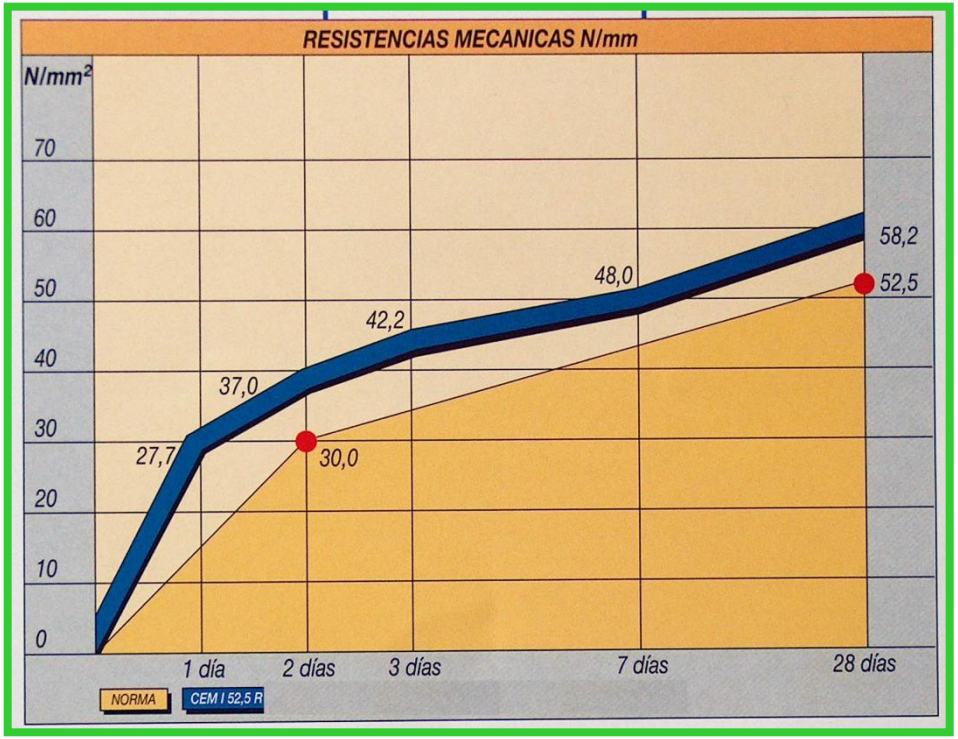
Los resultados se expresan en μm/m.

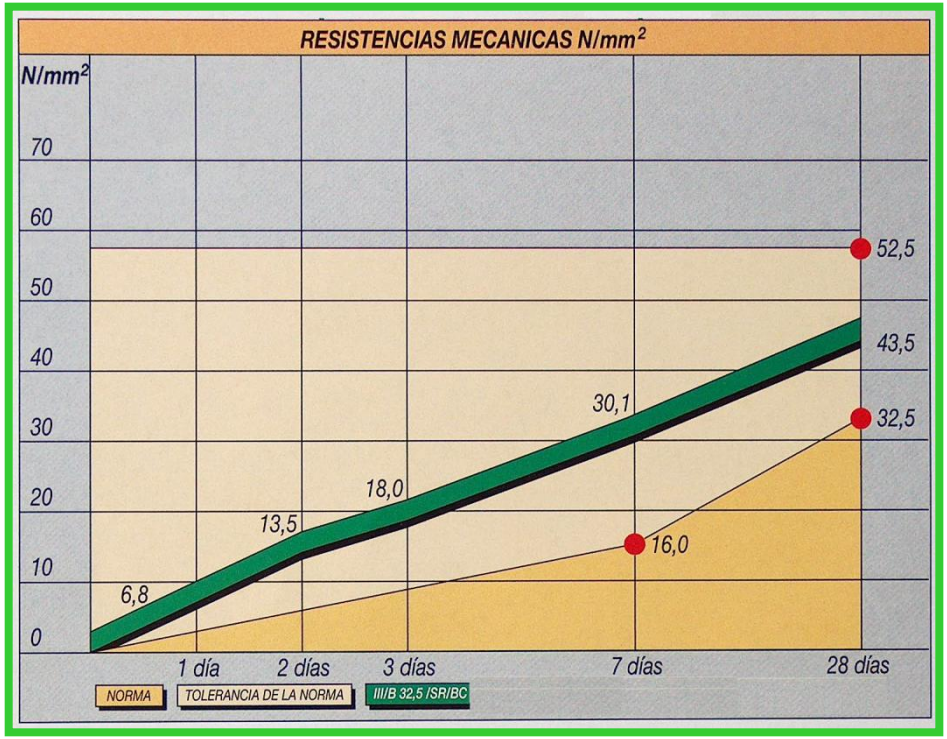
Propiedades de los Cementos

Resistencias mecánicas



Propiedades de los Cementos





Empleo de los Cementos

Los cementos se emplean, mayoritariamente, para la elaboración de morteros y hormigones

En forma de morteros se utilizan para:

- Solidarizar distintos elementos, como bloques, ladrillos o mampuestos, para formar los muros y tabiques
- Servir de material de agarre de baldosas y azulejos
- Revestir las diferentes fábricas constituyendo los enfoscados y revocos

Los hormigones se usan, primordialmente, con función estructural, ya sean en masa, armados o pretensados

En lo que hace referencia al cemento de aluminato de calcio (CAC), su uso resulta adecuado para:

- Hormigón refractario
- Reparaciones rápidas de urgencia
- Basamentos y bancadas con carácter temporal